WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

Древний веревочный компьютер, обнаруженный в джунглях острова Апрафал *

А. К. ДЬЮДНИ

НА ОСТРОВЕ Апрафал у северо-западного побережья Новой Гвинеи археологи обнаружили полусгнившие фрагменты замысловатой конструкции из веревок и блоков. Полагают, что это был первый в истории цифровой компьютер. Руководитель исследовательской группы Р. Л. Рипли из колледжа Чарльза Форта в Нью-Йорке датировал сооружение приблизительно 850 г. н. э.

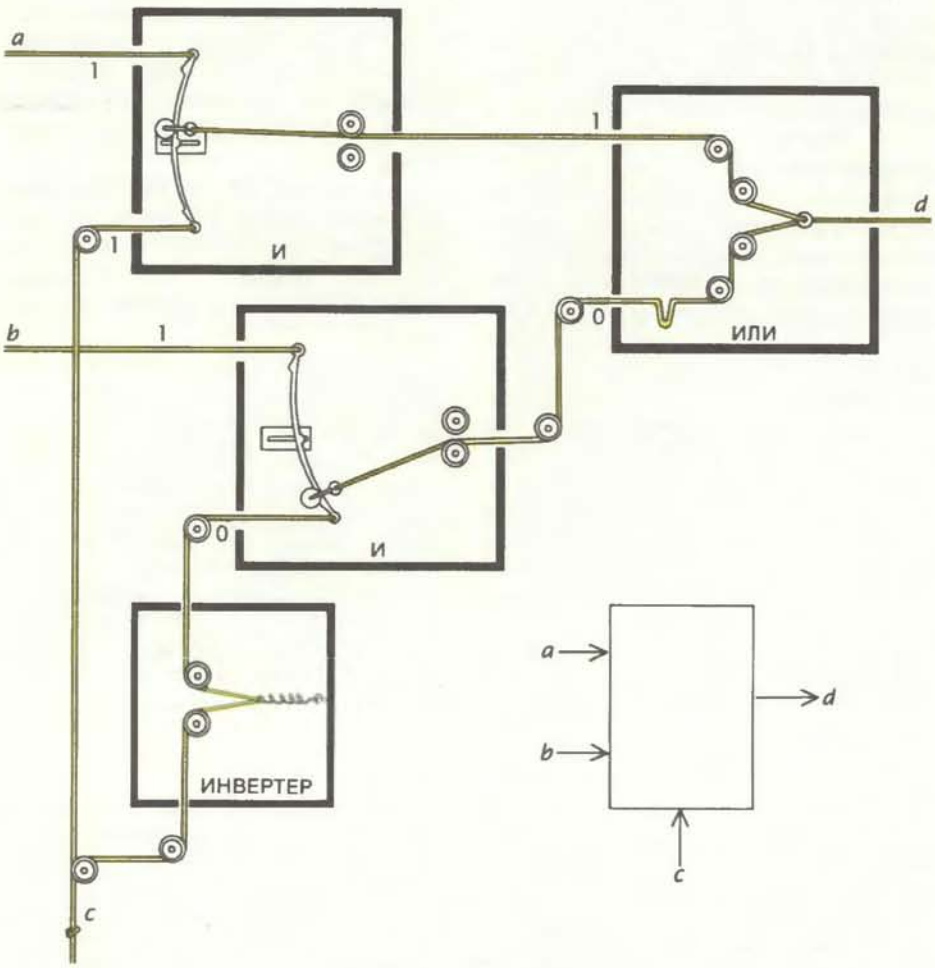
Апрафалитяне были отличными мореплавателями. Их корабли отличались добротностью и были прекрасно оснащены. Пришли ли апрафалитяне к своему веревочному компьютеру, потому что так мастерски владели корабельными устройствами из канатов и блоков, или все было как раз наоборот? Мнения специалистов разошлись, и между ними ведутся горячие споры.

Древний веревочный компьютер недавно был частично реконструирован группой исследователей во главе с Рипли в Тропическом музее морских древностей неподалеку от о. Суматра. Тщательно прочесав сплошь покрытую джунглями территорию в несколько квадратных километров к востоку от горного хребта Шу-Ток, она натолкнулась на следы истлевших джутовых веревок и отметила точное положение сильно окисленных медных блоков и других деталей. Эта реконструкция предоставила мне идеальную возможность познакомить читателей с принципами цифровой обработки данных, не прибегая к крошечным и загадочным электронным компонентам. Здесь есть и вентили, и триггеры, и другие разнообразные элементы, целиком состоящие из веревок и блоков. Все детали хорошо видны и нетрудно понять, как они работают.

Апрафалитяне, так же как и мы, пользовались двоичной системой счисления, но 0 и 1 были представлены в их «машине» не уровнями электрического напряжения, а положениями веревок. Представьте черный ящик с отверстием, просверленным в одной из его стенок, и что вы держите конец натянутой веревки, выходящей из отверстия. Такое положение веревки представляет цифру 0. Если теперь сильнее потянуть за веревку, из ящика послышится скрип и скрежет, и веревка выйдет из отверстия сантиметров на 30. В этом новом положении веревка будет представлять цифру 1.

При помощи таких ящиков можно представить все числа. Например, любое число в диапазоне от 0 до 7 может быть представлено тремя ящиками (см. таблицу на с.85). Чем бóльшим числом ящиков мы располагаем, тем большее по величине число можно представить с их помощью. Десяти ящиков достаточно для представления всех чисел в диапазоне от 0 до 1023.

Мой пример с черными ящиками вовсе не был произвольным. Апрафалитяне, по всей видимости, любили помещать свои механизмы в черные



Веревочный мультиплексор: веревка c *определяет, какой из сигналов*, a *или* b, *достигнет линии* d

*) Оригинальная статья опубликована в апрельском номере журнала "Scientific American". Желая придать ей юмористический характер, автор придумывает фантастический сюжет с вымышленным названием острова, его обитателей и т. д. Апрафал (в английском тексте Apraphul) созвучно английскому выражению April-fool, что в переводе означает «жертва первоапрельской шутки». Однако все что касается описания блочных устройств с веревками следует воспринимать не как шутку, а как попытку автора рассмотреть возможность имитации простейшими механизмами различных логических функций, выполняемых в обычном компьютере электронными схемами. — *Прим. ред.*

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

деревянные ящики, большие и маленькие. Может быть это объясняется тем, что строительство и использование компьютеров было исключительной привилегией какой-то технической жреческой касты. Вид огромных сооружений из черных ящиков, наверное, приводил толпу в благоговейный трепет.

Одно из основных устройств, которыми пользовались апрафалитяне, преобразовывало 0 в 1, а 1 в 0. (Иногда нам будет удобнее говорить «0» и «1», вместо «внутрь» и «наружу».) Похожий по своим функциям на то, что современные инженеры-электронщики назвали бы инвертером, этот интересный механизм представляет собой опять-таки черный ящик с двумя просверленными в нем отверстиями: одно на передней, а другое на задней стенке (см. рисунок внизу). Если кто-нибудь тянул веревку из отверстия в передней стенке, то из отверстия на противоположной стенке веревка выходила на такую же длину. Заглянув внутрь ящика, можно легко понять как он устроен: веревки, входящие в ящик спереди и сзади, проходят через два фиксированных блока и далее идут к верхней стенке, где крепятся к пружине.

Как уже, наверное, догадались некоторые читатели, цифры 0 и 1 кодировались не столько тем, куда двигалась веревка, *в* ящик (внутрь) или *из* ящика (наружу), сколько направлением ее движения. Этот принцип лучше всего продемонстрировать на примере с ящиком, в котором вообще нет никакого механизма. Веревка входит в отверстие на его передней стенке и выходит через отверстие на противоположной стороне. Если потянуть ее из положения 0 в положение 1 из переднего отверстия, она перейдет из положения «внутрь» в положение «наружу». Ее движение направлено в ту сторону, в какую тянут. В то же время у выходного отверстия веревка переходит из положения «наружу» в положение «внутрь», но поскольку и в этом случае веревка движется в направлении, в котором ее тянут, то и здесь она переходит из состояния 0 в состояние 1.

Еще два механизма почти завершают набор компонентов, которыми пользовались древние апрафалитяне для сооружения своих компьютеров. Первый механизм — это черный ящик с двумя входными и одной выходной веревками. Если хотя бы одна входная веревка находится в положении 1, то выходная также будет в состоянии 1. Апрафалитяне достигали этого эффекта исключительно простыми средствами (см. верхний рисунок на с. 86). Каждая веревка, входящая через переднее отверстие, проходила через пару блоков, и привязывалась к кольцу, соединенному с выходной веревкой. Если потянуть за одну или обе входные веревки, кольцо будет двигаться в том же направлении. Поскольку выход у этого черного ящика равен 1, если один *или* другой вход равен 1, современные инженеры назвали бы это устройство вентилем ИЛИ.

Древние островитяне умели также строить то, что мы называем вентилем И. При этом они пользовались тремя блоками и изогнутым стержнем (см. нижний рисунок на с. 86). Один блок, к оси которого была привязана выходная веревка, мог свободно скользить по стержню. Два других блока были спарены и служили главным образом для того, чтобы удерживать выходную веревку у отверстия в задней стенке ящика. Когда обе входные веревки находились в состоянии 0, изогнутый стержень совпадал с дугой окружности, центр которой находился между спаренными блоками у выхода. Если какую-нибудь из входных веревок оттянуть в положение 1, то один конец стержня сдвинется с линии покоящейся окружности. Блок, скрепленный с выходной веревкой, покатится «под гору», по направлению к другому концу стержня. Положение выходной веревки по существу остается тем же, что и прежде, поскольку этот конец стержня попрежнему будет совпадать с покоящейся окружностью. (Штырек в середине изогнутого стержня удерживает его ось на месте, когда натягивается лишь одна входная веревка.)

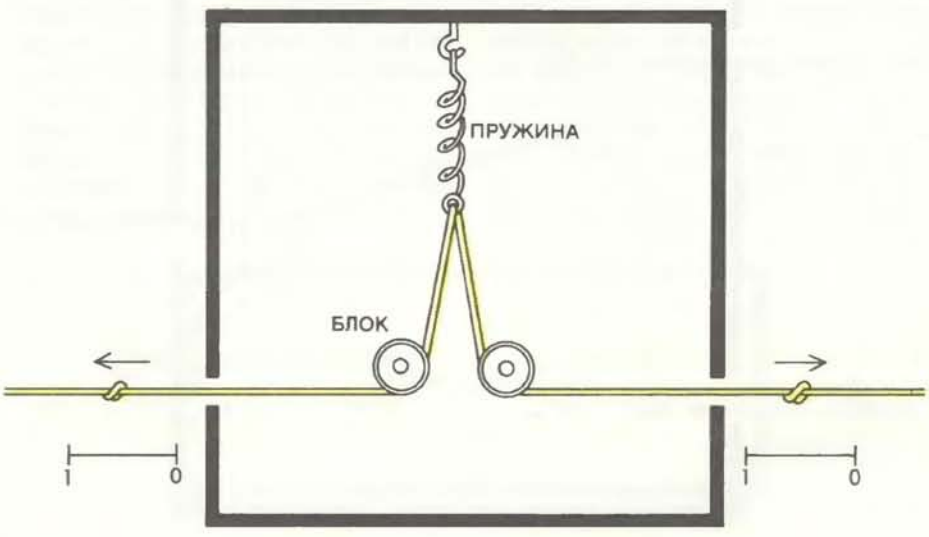
Только если обе входные веревки будут оттянуты в положение 1, выходная веревка тоже перейдет в положение 1. В данном случае весь стержень займет новое положение. На каком бы конце стержня не находился подвижный блок, он будет одинаково удален от выходных блоков. Это устройство мы называем вентилем И, потому что выход его равен 1 тогда и только тогда, когда *и* один, *и* другой вход находятся в состоянии 1.

ЯЩИК 1	ЯЩИК 2	ЯЩИК 3	ЧИСЛО
ВНУТРЬ	ВНУТРЬ	ВНУТРЬ	0
ВНУТРЬ	ВНУТРЬ	НАРУЖУ	1
ВНУТРЬ	НАРУЖУ	ВНУТРЬ	2
ВНУТРЬ	НАРУЖУ	НАРУЖУ	3
НАРУЖУ	ВНУТРЬ	ВНУТРЬ	4
НАРУЖУ	ВНУТРЬ	НАРУЖУ	5
НАРУЖУ	НАРУЖУ	ВНУТРЬ	6
НАРУЖУ	НАРУЖУ	НАРУЖУ	7

Представление чисел в веревочном компьютере

Теперь при наличии всех описанных выше компонентов можно построить любые управляющие схемы цифрового компьютера: схемы, выполняющие арифметические действия, схемы, которые интерпретируют коды машинных команд программы и управляют потоками информации между различными компонентами компьютера.

Был ли компьютер апрафалитян построен на аналогичных принципах? Пока на основании имеющихся данных еще трудно прийти к определенным выводам, однако археокомпьютологи, работающие под руководством Рипли, утверждают, что им удалось восстановить механизм, способный выполнять функции простого мультиплексора. В электронных компьютерах мультиплексор является по существу электрическим переключателем, который управляет прохождением многих сигналов по одной линии. В качестве примера рассмотрим простейший мультиплексор



Веревочный инвертер

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

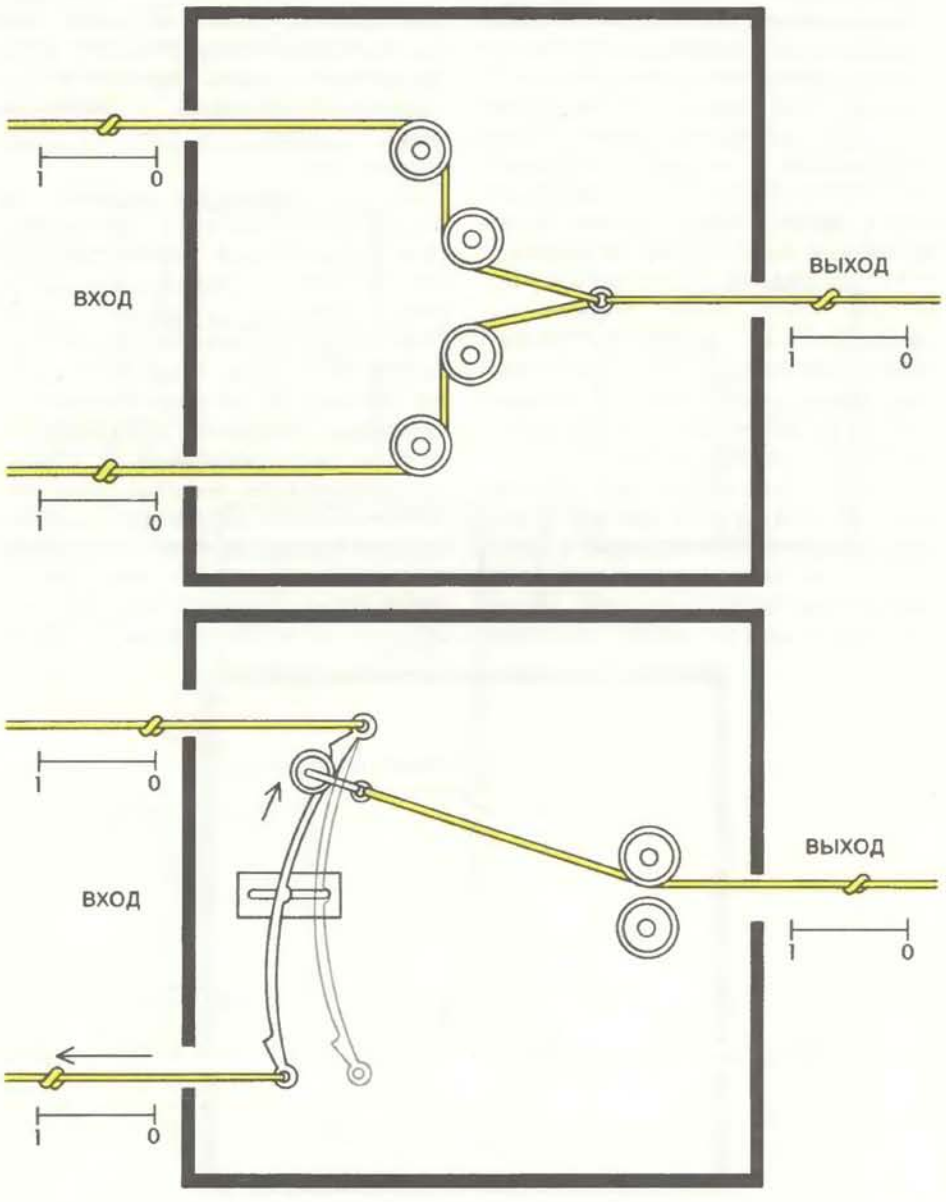
с двумя входными линиями, которые мы условно назовем d и b. В любой заданный момент времени на каждой из этих линий может быть сигнал, равный либо 0, либо 1. Какому из этих двух сигналов, передаваемому по линии d или b будет разрешено пройти через устройство и выйти по выходной линии d? Ответить на этот вопрос можно лишь при условии, если известно, в каком состоянии находится управляющая линия c: если на ней 1, то на выход пройдет сигнал со входа a; если же на управляющей линии 0, то пройдет сигнал b (см. рисунок на с. 84).

Восстановленный мультиплексор апрафалитян имел два информационных входа и состоял из двух вентилей И, одного вентиля ИЛИ и одного инвертера. Конструкция устройства настолько проста, что читатели смогут его построить сами. Не исключено, что в магазинах хозяйственных товаров в скором времени будут раскуплены все веревки. Глядя на схему, попробуем разобраться, как работает мультиплексор. Веревки a и b — это входные линии мультиплексора; каждая веревка идет к своему вентилю И. Веревка c разветвляется: одна ее ветвь идет непосредственно на вход вентиля И, к которому ведет также веревка a; вторая ветвь веревки c проходит через инвертер и затем на вход того вентиля И, к которому ведет входная веревка b. Если веревка c натянута так, что на ней устанавливается значение 1, и поддерживается в этом состоянии, то любая последовательность нулей и единиц, передаваемая вдоль веревки a, будет без изменений подано через верхний вентиль И на вентиль ИЛИ. В то же время любой сигнал, передаваемый по веревке b, будет задержан нижним вентилем И. Если же веревку c отпустить в положение 0, то инвертер выдаст 1 на входе нижнего вентиля И. В этом случае любой сигнал, передаваемый вдоль веревки b, будет теперь беспрепятственно проходить через нижний вентиль И, а сигналы на веревке a будут игнорироваться.

Вентиль ИЛИ просто связывает два входных сигнала воедино. Предположим, что в данный момент мультиплексор передает сигнал, приходящий по входной веревке a. Посмотрим, как будет работать мультиплексор. Если веревка c отпущена и находится в состоянии 0, то подвижный блок в ящике И откатится к концу изогнутого стержня. Таким образом, состояние 0 будет передано на выходную веревку и подано на входную веревку ящика ИЛИ. Другая входная веревка этого ящика уже находится в состоянии 0 (она не натянута). Естественное натяжение выходной веревки d приведет к тому, что она сразу примет частоту 0. Если теперь снова потянуть за веревку a, то натяжение передастся по только что рассмотренному пути, в результате чего веревка d изменит свое состояние.

Теперь рассмотрим вопрос о том, какую роль в компьютере апрафалитян играло натяжение веревок. Иногда, как это было в случае с вентилем ИЛИ, какая-то веревка оказывается ненатянутой. Естественно возникает опасность, что такая веревка соскользнет со своего блока. Рипли сообщил мне, что апрафалитяне учитывали такую возможность и применяли в своем компьютере специально модифицированный инвертер с очень слабой пружиной. Во всех местах, где ослабление натяжения веревки грозило каким-нибудь нарушением в работе механизма, они устанавливали «слабые инвертеры», которые позволяли поддерживать некоторое минимальное натяжение в веревках, несущих нулевой сигнал.

Ни один универсальный компьютер не может обойтись без памяти. Память апрафалитянского компьютера состояла из сотен специальных запоминающихся элементов, которые мы назвали бы триггерами. Здесь опять заметна способность апрафалитян находить простейшие решения. В соответствии с современной терминологией две входные линии механического триггера мы назовем линией установки и линией сброса (см. верхний рисунок на с. 87). Три веревочных линии устройства соединялись с помощью трех блоков таким образом, что, когда линия установки оттягивалась из ящика в положение 1, линия сброса переходила в положение 0. Общая веревочная линия прикреплялась к подвижному бруску в задней части ящика. Выходная веревка, будучи продолжением линии установки, имела большую навеску, которая подхо-



Вентиль ИЛИ (вверху) *и вентиль И* (внизу)

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

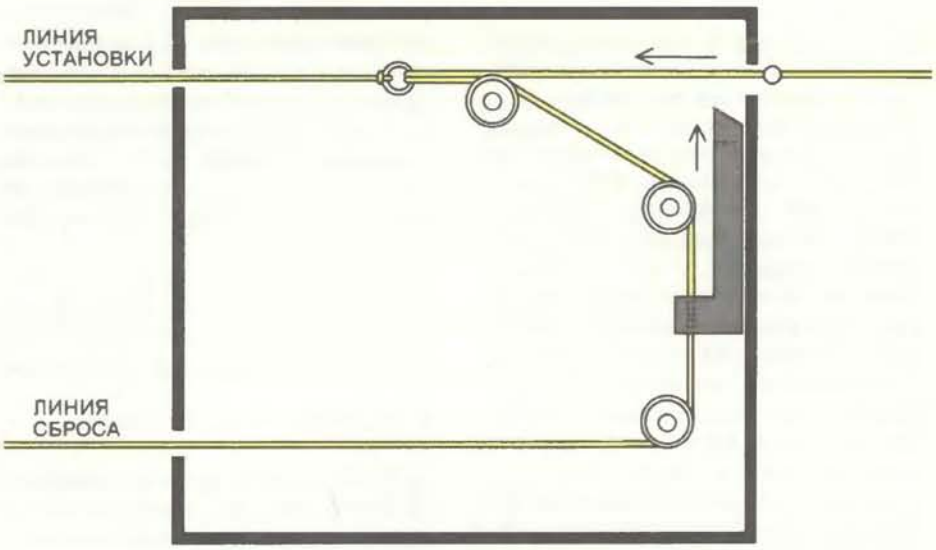
дила к прорези в подвижном бруске. Когда линия установки вытягивалась до предела, навеска над концом бруска попадала как раз в прорезь.

После этого выходная линия поддерживалась в одном и том же состоянии, пока гигантский веревочный компьютер в процессе своей работы не изменял состояние триггера при натягивании линии сброса. Подвижный брусок при этом отходил от навески, освобождая ее, в результате чего выходная линия переходила к состоянию 0. В данном случае, начиная с этого момента, триггер «запоминал» значение 0. Каким образом подобные элементы памяти использовались в веревочном компьютере?

Рипли и члены его группы были слегка озадачены, когда в самом центре гигантского компьютерного комплекса они обнаружили большое заросшее поле шириной около километра. Здесь под поверхностным слоем почвы скрывалось несколько тысяч полусгнивших деревянных ящиков-триггеров, лежащих рядами, по восемь устройств в ряду. Посоветовавшись с археo-компьютологами, Рипли в конце концов догадался, что это поле представляло собой не что иное, как главную память ископаемого компьютера. Каждый ряд из восьми ящиков, очевидно, составлял одно «восьмибитовое слово» точно так же, как три ящика в рассмотренном выше примере составляли трехбитовое слово. Допустим, что три триггера в этом случае имели значения 1,0 и 1, т. е. представляли число 5 в двоичном коде.

Доступ к таким словам памяти осуществлялся в веревочном компьютере следующим образом. Веревка с выхода каждого триггера в ряду тянулась к входу вентиля И. Другая входная веревка каждого вентиля И сообщалась со специальной веревкой, по которой поступал запрос на содержимое данного слова памяти. Когда эта веревка натягивалась, выходы вентилей И становились тождественными выходами соответствующих триггеров. Выходные веревки вентилей И в свою очередь поступали в большую конструкцию из вентилей ИЛИ, а оттуда в специальный массив триггера, который мы назвали бы регистром. Таким образом, стоило потянуть за веревку, соответствовавшую выбору данного слова памяти, как в регистре устанавливались те же значения битов, что и в выбранном слове.

Главное логическое устройство компьютера, несомненно, могло направлять потоки информации не только от памяти к регистрам, но и от регистра к регистру. Для таких пересылок в частности использовались



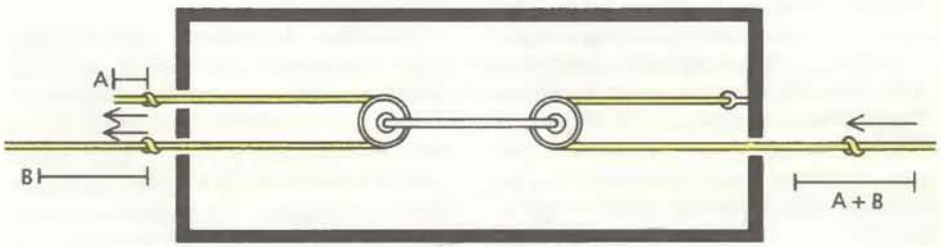
Триггер, служивший элементом памяти

мультиплексоры, а также устройства, выполнявшие обратные мультиплексору функции. В одном регистре, который по нашим понятиям был арифметическим, двоичные слова могли комбинироваться в соответствии с правилами сложения или умножения.

Полагают, что веревочный компьютер был программируемым. Если это так, то часть его огромной памяти использовалась для хранения программы. Команды программы также представлялись наборами из нулей и единиц, которые извлекались из памяти посредством описанного выше механизма. Из памяти эти наборы поступали в так называемый регистр команды, где интерпретировались логическим устройством компьютера.

К сожалению, недостаток места не позволяет мне более детально описать древнюю вычислительную машину, во всем ее великолепии и сложности. Во время работы она, должно быть, являла собой удивительное зрелище. Поскольку суммарная длина ее веревочных линий была колоссальной, ни одному человеку не хватило бы сил вытянуть линии ввода данных в нужное положение. Найденные на острове скелеты слонов ясно указывают нам на источник энергии, необходимой для того, чтобы приводить машину в действие. На выходных концах мощные пружины поддерживали необходимое натяжение веревочных линий системы. Возможно, к выходным веревкам были привязаны яркие флажки, глядя на которые жрецы технической касты могли читать результаты вычислений, производимых компьютером.

Интересно сопоставить ископаемый веревочный компьютер острова Апрафал с нанокомпьютером, о котором речь шла в мартовском номере журнала. Конечно, веревочный компьютер принадлежит далекому прошлому, в то время как нанокомпьютер — машина далекого будущего. Веревочный компьютер имел огромные размеры, занимая площадь в тысячи акров. В противоположность ему, нанокомпьютер невероятно мал — в тысячу раз меньше ядра биологической клетки человека. Сама концепция той и другой машины переносит нас в тот абстрактный мир, где увлекательное переплетено с серьезным. Возьмем, к примеру, мечту о создании машин, обладающих искусственным интеллектом. Нам проще поверить в то, что это возможно, если мы представим себе такую машину в виде электронного компьютера, потому что наше собственное мышление в значительной степени происходит на уровне электронных процессов. Однако поскольку любой совре-



Суммирующая веревочная машина

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

менный компьютер (и его программу) в принципе можно представить в виде веревочных конструкций островитян, то и любое устройство, обладающее искусственным интеллектом, независимо от того, реализуется оно в наше время или в будущем, также будет иметь свой веревочный аналог. А может быть действительно когда-нибудь появится «ХЭЛ- 9000» — «психически ненормальный» компьютер из научно-фантастического романа А. Кларка «2001-й год. Космическая одиссея»? Способны ли мы представить себе, что огромное сооружение из веревок и блоков может быть таким же разумным, как и мы?

Перед тем как покинуть остров Апрафал, бросим последний взгляд в его туманное прошлое. Интересно, какие устройства предшествовали огромному цифровому компьютеру в технической эволюции островитян? Конечно же, аналоговые. На рисунке внизу на с. 87 изображена схема аналоговой суммирующей машины, состоящей из двух веревок и двух блоков. Через два отверстия в передней стенке ящика пропущена веревка, которая внутри его проходит через блок; ось этого блока связана с осью другого блока. Один конец второй веревки прикреплен к задней стенке ящика. Она проходит через второй блок и выходит наружу из отверстия в задней стенке ящика. Возможно, читателям интересно самим разобраться в механизме, посредством которого эта машина складывает два числа. Если за два конца потянуть веревку на входе из ящика на расстояния a и b, то выходная линия должна переместиться на расстояние $a + b$.

Это ясно. А как островитяне умудрялись производить аналоговое умножение? Я попробую опубликовать описание самой простой из предложенных читателями конструкций.

Большинство программистов (как новичков, так и опытных), заинтересовавшихся видео-эффектами, описанными в нашей рубрике в февральском номере, выбрали для своих упражнений задачу с червяками. С. Африа из Оттавы, предыдущее письмо которого касалось головоломки о ханойской башне, рассмотренной нами еще в начале 1985 г., отмечает, что ползающие червяки представляют собой особенно эффектное зрелище, когда программа выполняется в откомпилированной форме.

У. Клементсу из Беверли-Хилла (шт. Калифорния) не понравилось поведение червяков на краях экрана. Вместо того чтобы позволять им уползать за пределы одного края и появляться на противоположной стороне экрана, программа Клементса изменяет направление их движения на величину +2,5 или −2,5 в зависимости от того, превосходит ли переменная *change* (изменение) значение 0,5.

Случай с Р. Скоттом-младшим из Мэдисона (шт. Виргиния), наверное, типичен для тех читателей, чьи компьютеры работают с версией Бэйсика, отличающейся от версии, которой мы пользовались в наших примерах. Червяки программы WORMS отказываются ползать по экранам их компьютеров. Подобные отличия, кажущиеся фатальными, обычно не очень значительны, и их легко обойти после того, как они выявлены.

Наука и общество

Гипотеза под ударами

Несколько раз за последние 600 млн. лет какие-то события настолько изменяли глобальные условия на Земле, что значительная часть всех организмов вымирала в течение относительно короткого времени. Наиболее массовое вымирание в конце мелового периода (65 млн. лет назад) привело к исчезновению более половины всех видов, включая, вероятно, и последних динозавров. Попытки объяснить эти события вызвали острые дискуссии.

Наибольшие споры ведутся вокруг импактной гипотезы (от англ. impact — удар), высказанной в 1980 г. Л. Альваресом и его коллегами из Лоуренсовской лаборатории в Беркли. Они предположили, что причиной массового вымирания в конце мела явилось падение на Землю крупного метеорита или кометы. Поднятые при ударе частицы пыли резко уменьшили освещенность поверхности, что привело к ослаблению фотосинтеза. В результате большинство живых существ погибло в течение нескольких недель.

Главным аргументом в пользу этого предположения является приуроченность во многих районах земного шара точно к границе мелового и третичного периодов (МТ-границе) слоя глин, обогащенных иридием. Иридий — редкий элемент в земной коре, но в некоторых метеоритах его содержание относительно высоко. По расчетам Альвареса, метеорит диаметром 10 км мог выбросить в атмосферу количество обогащенной иридием пыли, достаточное для образования иридиевого слоя глобального распространения.

Выводы Альвареса подтверждались находками в глинах на МТ-границе сажи, возможно, образовавшейся в результате огромных пожаров, вызванных ударом. Еще более показательны зерна кварца с нарушениями, которые, как полагают, являются следствием сильного удара. Такие зерна кварца на МТ-границе были обнаружены в прошлом году во многих районах мира Б. Бохором из Геологической службы США. До этого кварц подобной формы встречали только вблизи известных метеоритных кратеров. Таким образом, его повсеместная распространенность свидетельствует в пользу катаклизма глобальных масштабов.

Куда же упал метеорит? Отсутствие кратера, явно «привязанного» к МТ-границе, многие годы смущало сторонников импактной гипотезы. Однако в настоящее время в качестве такой структуры рассматривают подходящий по возрасту кратер диаметром 35 км в шт. Айова, хотя его размеры меньше предсказанных Альваресом — 200 км. То, что кратер находится в Северной Америке, может объяснить, почему концентрация зерен кварца со следами ударной деформации на МТ-границе, по данным Г. Изетта из Геологической службы США, на несколько порядков величины больше, а сами зерна имеют большие размеры, чем в Европе.

Р. Принн из Массачусетского технологического института в развитие первоначальной импактной гипотезы предположил, что вымирания явились результатом воздействия кислотных дождей, вызванных разогревом атмосферы при ударе. Расчеты показывают, что падение метеорита диаметром несколько километров могло привести к образованию окиси азота в количестве, достаточном для превращения дождей над обширными районами в концентрированный раствор азотной кислоты. Свидетельства в подтверждение этой идеи были найдены Д. Макдугаллом из Скриппсовского океанографического института. Он обнаружил резкое изменение изотопного состава стронция в морских осадках точно на МТ-границе, что могло быть следствием увеличения скорости вымывания стронция кислотными дождями на континентах.

Тем не менее импактная гипотеза, объясняющая массовое вымирание на МТ-границе, принимается не всеми. Некоторые ее оппоненты считают, что как вымирание, так и геологические феномены на МТ-границе были следствием каких-то других причин. Ряд исследователей (включая многих